

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241399

# 计及传热效应的配电网弧光接地故障模型及混合消弧方法研究

蒋冲<sup>1,2</sup>, 范必双<sup>1,2</sup>, 徐向前<sup>1,2</sup>, 黄芸红<sup>1,2</sup>, 王文<sup>1,2</sup>, 喻锬<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学电网  
防灾减灾全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 配电网弧光接地故障(arc grounding faults, AGF)易引发保护拒动与次生灾害。现有模型因忽略接地介质击穿与电弧传热效应, 难以准确表征弧光高阻接地故障(arc high-resistance grounding faults, AHGF)的动态特性, 且传统消弧方法存在高阻工况适应性差的缺陷。为此, 首先提出一种计及传热效应的配电网 AGF 故障模型及混合消弧方法, 建立融合介质击穿特性与电阻率温变模型的接地电阻模型。然后, 构建变尺寸 Mayr-Cassie 电弧传热耦合模型, 设计无源消弧与有源消弧串联的混合消弧拓扑, 降低有源消弧的有功功率占比。最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真与白桦、红土、混凝土 3 类典型接地介质的真型配电网 AGF 故障实验结果表明: 所提 AGF 模型能准确有效表征故障特性, 其全周期电流波形相关系数达 0.8734~0.9173。所提混合消弧方法能对各 AHGF 故障进行有效、可靠消弧。

**关键词:** 配电网; 弧光接地故障; 介质击穿; 传热效应; 混合消弧

## Research on arc grounding fault model considering heat transfer effects and hybrid arc suppression method for distribution networks

JIANG Chong<sup>1,2</sup>, FAN Bishuang<sup>1,2</sup>, XU Xiangqian<sup>1,2</sup>, HUANG Yunhong<sup>1,2</sup>, WANG Wen<sup>1,2</sup>, YU Kun<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Arc grounding faults (AGF) in distribution networks can trigger protection maloperation and secondary hazards. Existing fault models often fail to accurately represent the dynamic characteristics of arc high-resistance grounding faults (AHGF) due to neglected dielectric breakdown and arc heat transfer effects. Additionally, conventional arc suppression methods exhibit poor adaptability under high-resistance conditions. To address these issues, this paper proposes an AGF model incorporating heat transfer effects and a hybrid arc suppression method. A grounding resistance model is established that integrates dielectric breakdown characteristics with temperature-dependent resistivity. A variable-dimension Mayr-Cassie arc model with thermal coupling is developed. A series-connected hybrid topology combining passive and active arc suppression is designed to reduce active suppression's active power consumption. Finally, experimental and simulation results based on MATLAB/Simulink and real distribution network AGF tests with three typical grounding media (birch, red soil, and concrete) demonstrate that, the proposed AGF model can accurately represent fault characteristics, achieving full-cycle current waveform correlation coefficient of 0.8734~0.9173. The proposed hybrid arc suppression method can effectively and reliably suppress various AHGF faults.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277077).

**Key words:** distribution network; arc grounding faults; dielectric breakdown; heat transfer effect; hybrid arc suppression

## 0 引言

10 kV 配电网作为电力系统的重要组成部分,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277077)

其安全性和稳定性对于电力供应的可靠性至关重要<sup>[1-3]</sup>。在配电网运行过程中, 弧光接地故障的发生不仅会引发电能损耗, 还可能导致设备损坏和大面积停电, 严重影响电网的正常运行<sup>[4-5]</sup>。当触树、触土等弧光高阻接地故障发生时, 故障电流信号微弱,

导致继电保护措施难以检测到故障发生, 电弧的持续存在将引发火灾、触电等次生灾害<sup>[6-9]</sup>。因此, 研究和建立精确的弧光接地故障(arc grounding faults, AGF)物理数学模型, 并在 AGF 发生时有效消弧对电力系统安全可靠运行意义重大。

然而现有对 AGF 故障模型的研究存在一定局限性。现有模型多基于静态假设, 未能充分考虑复杂的接地条件和环境因素<sup>[10-11]</sup>。例如, 接地介质几何形状、温度变化等因素都会显著影响接地介质电阻的特性<sup>[12-13]</sup>。然而, 传统模型通常忽视以上因素的动态变化, 使得模型在实际应用中无法准确反映接地介质的电阻特性<sup>[14-15]</sup>。此类简化假设可能导致故障分析和处理的结果不够精确, 进而影响电力系统的安全运行。同时, 现有电弧模型无法描述电弧的动态演变过程, 忽视了电弧发展过程中温度、形态变化以及电流波动对电弧特性的影响<sup>[16-17]</sup>。此类简化使得现有模型在实际故障情况下, 尤其是在高阻接地故障情况下, 无法准确模拟电弧特性。电弧动态行为受到多种因素的影响, 包括电弧几何尺寸、故障电流以及周围空气的性质等<sup>[14,18-19]</sup>。电弧特性随时间和环境条件的变化而变化, 现有模型未能考虑该时变特性, 导致在故障分析中可能出现偏差<sup>[20-21]</sup>。因此, 对接地介质的电阻建模时需考虑接地介质形状、电阻率波动、介质击穿等因素。同时, 对电弧电阻进行更为细致的建模研究, 将为提高 AGF 动态特性的理解提供新的视角。

根据消弧装置有无外加电源, 可分为无源消弧方法和有源消弧方法。由于接地变压器漏抗的存在, 中性点电压可能出现相位偏移, 使得无源消弧无法对 AGF 完全消弧<sup>[22]</sup>。有源消弧又可分为有源电流消弧和有源电压消弧。文献[23]提出一种混合并联电流消弧方法, 但该方法对弧光高阻接地故障(arc high-resistance grounding faults, AHGF)消弧时, 无法将故障电压降低至灭弧电压以下, 易发生故障重燃<sup>[15]</sup>。因此研究适用 AHGF 的消弧方法十分必要。

为了解决上述问题, 本文提出了一种多情况接地介质电阻建模方法, 综合考虑了介质击穿和电流积温对接地介质电阻的影响, 并建立了一种计及电弧传热效应的变尺寸 Mayr 和 Cassie 组合电弧模型。该方法引入了接地介质的动态特性, 同时以故障电流为引线, 模拟 AGF 过程中的电弧传热效应。通过 10 kV 真型配电网实验验证了所提模型的有效性与准确性, 与实际故障工况相符。同时, 利用隔离变压器将无源消弧和有源电压消弧串联构建混合串联消弧装置。通过 MATLAB/Simulink 仿真分析, 所提混合串联消弧方法能对各 AHGF 进行有效、可靠

消弧, 且降低了有源消弧的有功功率占比。为配电网故障防护体系提供了精确的 AGF 理论模型与高阻工况下的消弧装备研制依据。

## 1 弧光接地故障组成及分析

弧光接地故障是多情况的、动态的、发展的。同时, 消弧措施的投入影响着故障的发展。弧光接地故障电阻  $R_f$  为电弧电阻  $R_{arc}$  与接地介质电阻  $R_d$  串联的总和, 即  $R_f = R_{arc} + R_d$ 。故而  $R_f$  的非线性特征受到电弧、接地介质两者的影响, 配电网 AGF 电阻串联模型如图 1 所示。

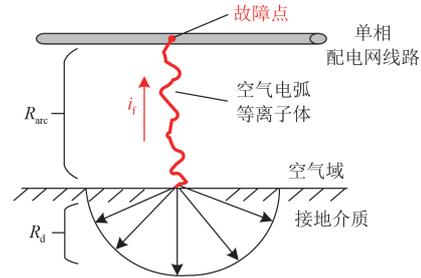


图 1 配电网 AGF 电阻串联模型

Fig. 1 AGF resistor series model for distribution network

### 1.1 接地介质电阻 $R_d$ 的分析与建模

自然环境中, 能同架空电缆发生弧光接地故障的接地介质主要分为两种: 一种以树枝、杆塔为代表的圆柱体电极; 另一种以土壤、混泥土地面为代表的无穷远地面电极。由于树枝有庞大的根系, 杆塔普遍配有接地网, 因此可将圆柱体电极的地面视为零电势面。圆柱体接地介质电阻分析如图 2 所示。

电弧同接地介质接触后, 强电场使得部分接地介质发生击穿<sup>[11,24]</sup>。同时假设  $E_{bk}$  为接地介质的临界

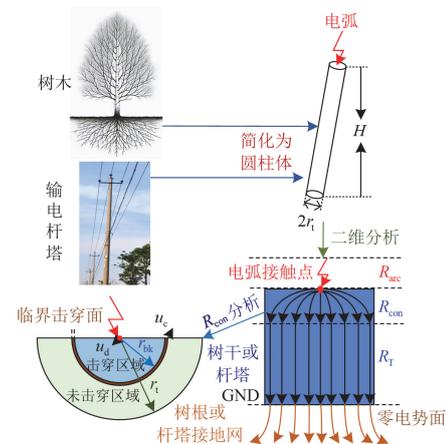


图 2 圆柱体电极接地介质电阻分析

Fig. 2 Analysis of grounding medium resistance of cylindrical electrode

击穿场强, 且整个介质中仅存在击穿、非击穿两种状态, 即可认为介质临界击穿半径  $r_{bk}$  处的场强为临界击穿场强。

假设圆柱体电极半径为  $r_1$ , 高度为  $H$ 。AGF 电流  $i_f$  在树木中的流动方向为电弧-接触树枝-侧枝-主枝-主干-树根<sup>[25]</sup>。同时, 树枝纵向(树木生长方向)、径向和切向相对电阻率的近似关系为 1.0:1.82:2.0<sup>[26]</sup>, 电流在流经树木时纵向相对电阻率起主要作用。因此可以忽略 AGF 电流在圆柱体接地介质中的径向、切向流动, 仅考虑纵向流动。介质击穿边界上的电压  $u_c$  表达式如式(1)所示。

$$u_c = u_d - E_{bk} \cdot r_{bk} \quad (1)$$

式中:  $u_d$  为施加于圆柱体电极上的电压。同时, 介质临界击穿半径  $r_{bk}$  至  $r_1$  的接触体电阻  $R_{con}$  与圆柱体的主干电阻  $R_T$  的表达式分别如式(2)、式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$R_{con} = \frac{\rho_T}{2\pi} \left( \frac{M}{\sqrt{1 + M \cdot u_d / E_{bk}} - 1} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2)$$

$$R_T = \rho_T \frac{H}{\pi r_1^2} \quad (3)$$

式中:  $\rho_T$  为接地介质纵向电阻率;  $M$  为过程参数,  $M = -r_1^{-1} + 2\pi R_T \cdot \rho_T^{-1}$ 。

发生 AGF 后, 电流流经接地介质产生大量热量, 形成积温效应, 使得接地介质温度升高, 进而促使  $\rho_T$  发生温变, 两者关系式如式(4)所示。

$$\rho_T = \rho_0 [k_m (e^{A(1/T_i - 1/T_0)} - 1) + 1] \quad (4)$$

式中:  $\rho_0$  为环境温度(25 °C)下的接地介质电阻率;  $T_0$  为环境温度;  $T_i$  为当前时刻的接地介质温度;  $k_m$ 、 $A$  为接地介质材料相关参数。由于空气的热导率较小, 在整个故障过程中, 整体接地介质的温升较小, 即介质同空气间的温差较小, 热效应微弱, 因此本研究不讨论接地介质的散热对流情况。则当前时刻接地介质温度  $T_i$  与前一时刻温度  $T_{i-1}$  间的关系为

$$T_i = T_{i-1} + \frac{p_{wi,d}}{C_p \rho V} = T_{i-1} + \frac{i_f^2 R_d}{C_p \rho V} (V = \pi r_1^2 H) \quad (5)$$

式中:  $C_p$ 、 $\rho$  和  $V$  分别为环境温度  $T_0$  下接地介质的比热容、密度和体积;  $p_{wi,d}$  为介质的输入热功率。因此圆柱体接地介质电阻  $R_d$  的表达式如式(6)所示。

$$R_d = R_{con} + R_T + \frac{E_{bk} r_{bk}}{i_f} = \frac{2 + M \cdot r_{bk}}{1 + M \cdot r_{bk}} (R_{con} + R_T) \quad (6)$$

以  $r_1 = 0.025$  m、 $H = 0.5$  m 的新鲜白桦树枝为例, 综合式(1)~式(6)可得圆柱体接地介质的介质击穿和电流积温对其电阻率的影响, 如图 3 所示。

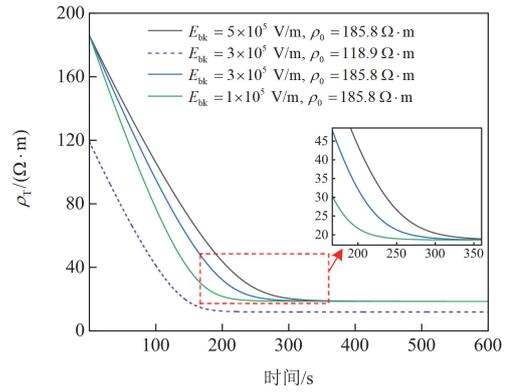


图 3 介质击穿和电流积温对树枝电阻率的影响

Fig. 3 Effect of dielectric breakdown and current accumulation temperature on the resistivity of branches

可以看出, 随着故障持续, 电流积温使得介质电阻率持续下降, 最后趋于稳定, 这与文献[12]中触树故障的过渡电阻波形趋势一致。在 25 °C 下  $\rho_0$  保持一致时, 接地介质的临界击穿场强  $E_{bk}$  与  $\rho_T$  斜率成反比, 即较大的临界击穿场强能减缓电流积温。同时, 较低的  $\rho_0$  能加快电流积温, 且最终的稳定电阻率较小。

土壤等无穷远地面电极可视为圆柱体电极的特例, 即  $r_1$ 、 $H = \infty$ ,  $R_T = 0$ , 使得  $M$  趋于无穷小。

## 1.2 电弧电阻 $R_{arc}$ 的分析与建模

弧光接地故障的电弧部分实质上是强电场下空气激发形成的电弧等离子体<sup>[19]</sup>。在无风情况下, 均匀分布在电缆与接地介质之间。因此可将电弧等离子体简化为半径为  $r_{arc}$ 、长度为  $L_{arc}$  的圆柱体模型。

对于小电流, 广泛使用的数学模型是 Mayr 模型; 对于大电流, 广泛使用的数学模型为 Cassie 模型。在实际应用中, AGF 呈现动态演化特性。因此针对电弧进行建模需同时考虑 Mayr、Cassie 两种模型, 同时电弧是动态发展的, 即  $r_{arc}$ 、 $L_{arc}$  是不定的。令电弧电导  $g = 1/R_{arc}$ , 其动态特性由微分方程描述<sup>[27]</sup>, 如式(7)所示。

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{u_{arc} i_f}{g U_0^2} [1 - \varepsilon(i_f)] + \left( \frac{u_{arc} i_f}{p_{loss}} + \frac{G_{min}}{g} \right) \varepsilon(i_f) - 1 \right\} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left( 1 - \ln \frac{g L_{arc}}{\sigma_0 S} \right) - \frac{1}{L_{arc}} \frac{dL_{arc}}{dt} \left( 1 + \ln \frac{g L_{arc}}{\sigma_0 S} \right) \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为时间常数;  $s$ ;  $u_{arc}$  为电弧电压,  $u_{arc} = i_f/g$ , V;  $U_0$  为 Cassie 模型中的稳定燃弧电压常数, V;  $p_{loss}$  为 Mayr 模型中的耗散功率, W;  $G_{min}$  为瞬时电流衰减过程中电导的最小值 ( $G_{min} > 0$ ), S;  $S$  为

电弧截面积,  $S = \pi r_{\text{arc}}^2$ ;  $\sigma_0$  为稳定燃弧时电弧电导率的近似系数, S/m;  $\varepsilon(i_f)$  为权重函数, 其与  $i_f$  的关系式为

$$\varepsilon(i_f) = \exp\left(-\frac{i_f}{I_0^2}\right) \quad (8)$$

式中:  $I_0$  为电弧高阻与低阻模型的切换电流。

自然环境中, AGF 普遍为高阻故障。因此, AGF 数学模型的关键参数为  $p_{\text{loss}}$ 。  $p_{\text{loss}}$  受到热传导、热对流、热辐射 3 种传热效应的影响<sup>[20]</sup>, 三者共同决定了电弧的温度分布、稳定性和动态行为。

本研究假设电弧内部温度  $T_{\text{arc}}$  均匀分布, 忽略电弧内部的热传导效应。对电弧传热进行二维对称分析, 电能输入电弧的功率为  $p_{\text{in\_arc}}$ , 如图 4 所示。

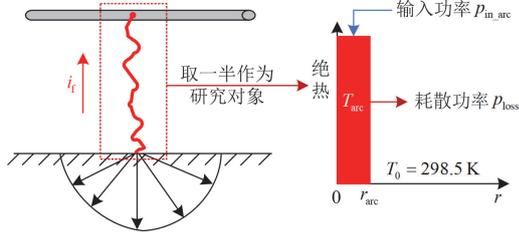


图 4 电弧二维轴对称传热分析

Fig. 4 Two-dimensional axisymmetric heat transfer analysis of arc

在圆柱坐标系内, 电弧处于非稳态传热过程, 且包含内热源。左侧边界为绝热, 右侧边界为对流传热和辐射传热。假设电弧内部温度均匀, 在  $r$  轴上有边界条件。

$$\begin{cases} -\lambda_{\text{arc}} \frac{\partial T_{\text{arc}}}{\partial r} = h(T_{\text{arc}} - T_0) + \varepsilon\sigma(T_{\text{arc}}^4 - T_0^4), r = r_{\text{arc}} \\ \frac{\partial T_{\text{arc}}}{\partial r} = 0, r = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_{\text{arc}}$  为空气与其电弧等离子体的导热系数;  $h$  为表面对流传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $\varepsilon$  为发射系数。

在本模型中, 假设电弧等离子体同空气的对流方式仅为自然对流, 因此表面对流传热系数  $h$  的表达式如式(10)所示。

$$h = \frac{\lambda_{\text{arc}}}{D} \cdot C_{\text{Nu}} \quad (10)$$

式中:  $D$  为电弧圆柱体直径;  $C_{\text{Nu}}$  为努塞尔特数, 需利用雷诺数  $C_{\text{Ra}}$ 、普朗特数  $C_{\text{Pr}}$  和格拉晓夫数  $C_{\text{Gr}}$  计算得到, 计算式如式(11)一式(13)所示。

$$C_{\text{Nu}} = 0.6 + 0.387(C_{\text{Ra}} \cdot C_{\text{Pr}})^{\frac{1}{6}} \cdot \left[1 + \left(\frac{0.559}{C_{\text{Pr}}}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}} \quad (11)$$

$$C_{\text{Pr}} = \frac{\nu \cdot \rho_{\text{arc}} \cdot C_{\text{p\_arc}}}{\lambda_{\text{arc}}} = \frac{\mu_{\text{arc}}}{\rho_{\text{arc}}} \cdot \frac{\rho_{\text{arc}} \cdot C_{\text{p\_arc}}}{\lambda_{\text{arc}}} \quad (12)$$

$$C_{\text{Ra}} = C_{\text{Gr}} \cdot C_{\text{Pr}} = \frac{\rho_{\text{arc}} C_{\text{p\_arc}} \cdot g \cdot \beta(T_{\text{arc}} - T_0) \cdot D^3}{\nu \cdot \lambda_{\text{arc}}} \quad (13)$$

式中:  $\nu$  为电弧等离子体的运动粘度, m<sup>2</sup>/s;  $\mu_{\text{arc}}$  为电弧等离子体的动力粘滞系数;  $C_{\text{p\_arc}}$ 、 $\rho_{\text{arc}}$  分别为空气与其电弧等离子体的比热容、密度, 均与电弧温度相关<sup>[28]</sup>, 其与温度的关系如图 5 所示;  $\beta$  为体膨胀系数, 约等于  $T_0^{-1}$ ;  $g$  为重力加速度。

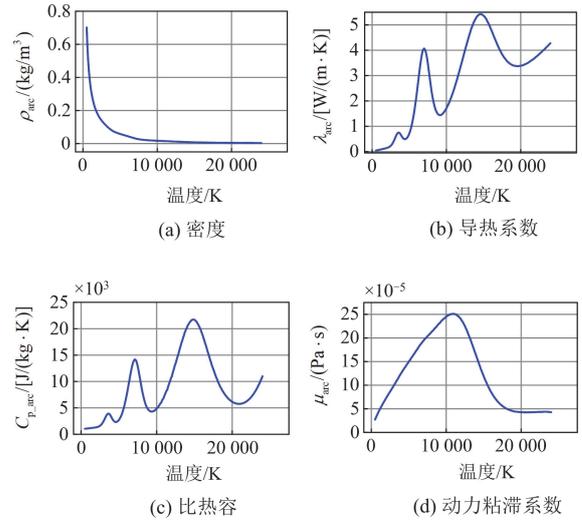


图 5 空气电弧等离子体参数与温度的关系

Fig. 5 Relationship between air arc plasma parameters and temperature

单位体积电弧热能的增加等于热传导扩散项与内热源输入项之和, 因此热传导方程表示为

$$\rho_{\text{arc}} C_{\text{p\_arc}} \frac{\partial T_{\text{arc}}}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{\text{arc}} r \cdot \frac{\partial T_{\text{arc}}}{\partial r} \right) \right] + \Phi \quad (14)$$

式中:  $\Phi$  为内热源强度, 其等于电能输入单位体积电弧的功率, 计算式如式(15)所示。

$$\Phi = \frac{P_{\text{in\_arc}}}{V_{\text{arc}}} = \frac{u_{\text{arc}} i_f}{\pi r_{\text{arc}}^2 \cdot L_{\text{arc}}} \quad (15)$$

式中:  $V_{\text{arc}}$  为电弧等离子体的体积。令电弧耗散热流密度  $q_{\text{loss}} = -\lambda_{\text{arc}} \times (\partial T_{\text{arc}} / \partial r)$ , 则单位计算时间间隔  $\Delta t$  内的电弧温差  $\Delta T_{\text{arc}}$  的表达式如式(16)所示。

$$\Delta T_{\text{arc}} = \frac{\Delta t}{\rho_{\text{arc}} C_{\text{p\_arc}}} \left( -\frac{q_{\text{loss}}}{r_{\text{arc}}} - \frac{\partial q_{\text{loss}}}{\partial r_{\text{arc}}} + \frac{u_{\text{arc}} i_f}{\pi r_{\text{arc}}^2 \cdot L_{\text{arc}}} \right) \quad (16)$$

因此, 耗散功率  $p_{\text{loss}}$  的表达式如式(17)所示。

$$p_{\text{loss}} = q_{\text{loss}} \cdot A_{\text{arc}} = q_{\text{loss}} \cdot (2\pi r_{\text{arc}} \cdot L_{\text{arc}}) \quad (17)$$

式中:  $A_{\text{arc}}$  为电弧圆柱体侧面积。配电网电能传输

处于基频(50 Hz), 这使得 AGF 电流属于交流, 促使热传导扩散项和内热源输入项处于博弈状态, 引发电弧温度的波动, 进而使得电弧半径发生变化。则电弧半径  $r_{arc}$  的表达式如式(18)所示。

$$r_{arc} = \int_{t_{begin}}^{t_{end}} \frac{P_{in\_arc} - P_{loss}}{k\pi T_{arc} L_{arc} \rho_{arc} C_{p\_arc}} dt + r_{arc\_ini} \quad (18)$$

式中:  $t_{begin}$  和  $t_{end}$  分别为 AGF 的开始时间和结束时间;  $k$  为电弧温度波动系数;  $r_{arc\_ini}$  为初始电弧半径。当土壤、混凝土等无穷远地面和架空线杆塔为接地电极时, 电弧长度(故障点同接地电极的间距)一般可视为固定值。当树枝作为接地电极时, 由于风速和树木自身结构, 使得其发生来回摆动。本研究假设树枝为周期摆动, 其摆动速度  $V_w$  表达式如式(19)所示。

$$V_w = V_c \cdot \sin(2\pi \cdot t / T_w) \quad (19)$$

式中:  $V_c$  为树枝周期性摆动速度幅值, m/s;  $T_w$  为树枝摆动周期, ms。因此, 当树枝为接地电极时, 电弧长度  $L_{arc}$  的表达式如式(20)所示。

$$L_{arc} = \int_{t_{begin}}^{t_{end}} V_w dt + L_{arc\_ini} \quad (20)$$

式中:  $L_{arc\_ini}$  为故障点同接地电极的初始间距。

## 2 AGF 模拟与控制策略

### 2.1 弧光接地故障模型仿真电路

图 6 为基于 MATLAB/Simulink 构建的配电网弧光接地故障模型仿真电路。10 kV 配电网采用升压变压器, 额定输入输出电压为 0.4 kV/10.5 kV, 且采用中性点不接地方式。在配电网 10 kV 母线接入 3 条馈线, 其中包括两条架空线路 L1、L2, 一条电缆线路 L3。L3 的 C 相上连接 AGF 模拟电路。10 kV 配电网线路参数如表 1 所示。

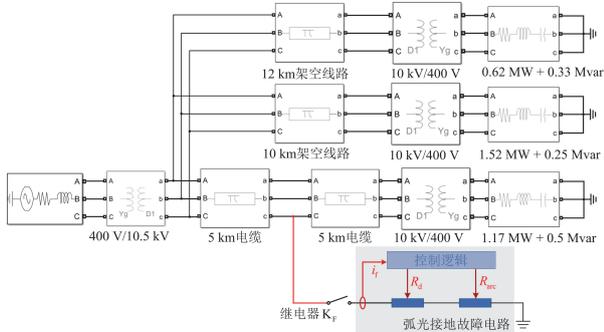


图 6 AGF 模型仿真电路结构

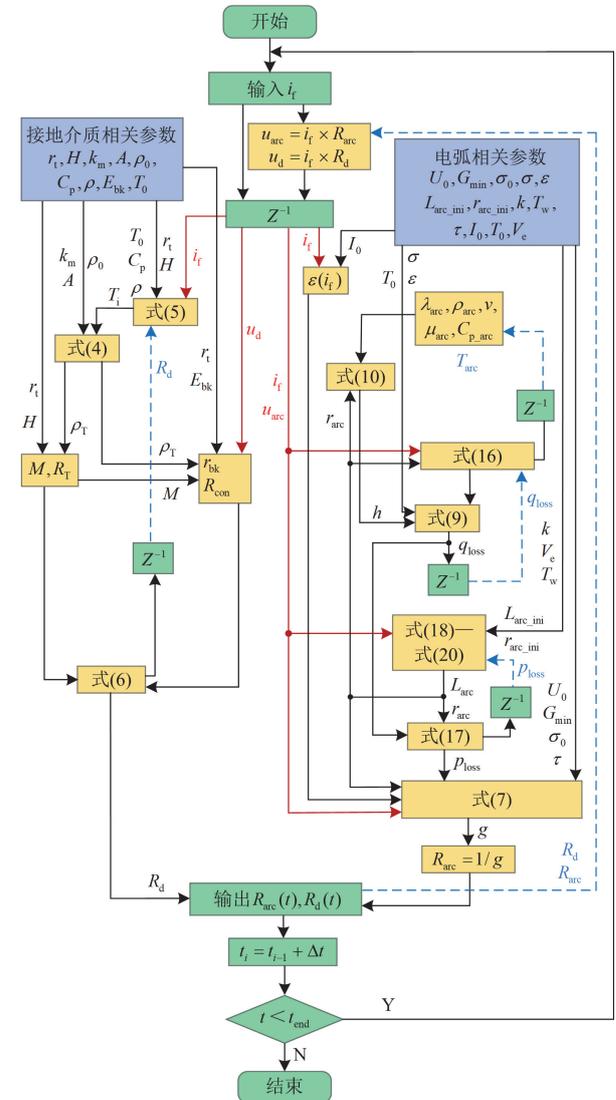
Fig. 6 Simulation circuit structure of AGF fault model

表 1 模拟配电网线路参数

类型	零序参数			正序参数		
	$R_0/$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_0/$ (mH/km)	$C_0/$ ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )	$R_1/$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_1/$ (mH/km)	$C_1/$ ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )
电缆	0.35	1.54	0.26	0.12	0.52	0.29
架空线路	0.23	5.48	0.008	0.17	1.21	0.011

### 2.2 弧光接地故障模型控制逻辑

图 7(a)和图 7(b)分别为 AGF 模型算法逻辑和基于 MATLAB/Simulink 构建的 AGF 控制算法。算法逻辑以  $i_f$  为输入量, 并以式(4)一式(6)获取接地介质电阻  $R_d$  作为输出量; 同时, 基于式(17)一式(20)获取电弧耗散功率  $p_{loss}$  与变尺寸参数  $r_{arc}$ 、 $L_{arc}$ , 以式(7)获取电弧电阻  $R_{arc}$  作为输出量。



(a) AGF模型的算法逻辑

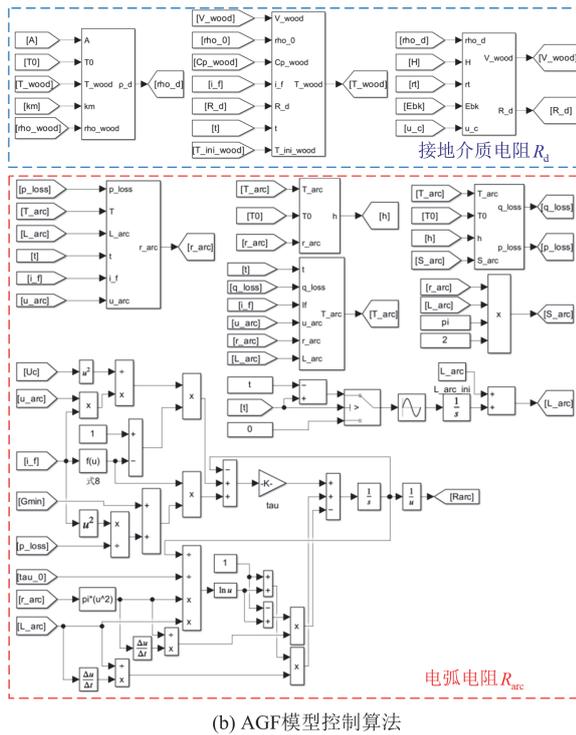


图 7 AGF 模型的算法逻辑和控制算法

Fig. 7 Algorithm logic and control algorithm of AGF model

### 3 弧光接地故障仿真及实验论证

基于图 6 所示的 AGF 仿真电路, 在 10 kV 真型配电网中搭建弧光接地故障实验现场, 实验现场接线实况如图 8 所示。在故障点安装录波装置, 采集弧光接地故障电流波形数据, 并对其进行分析。

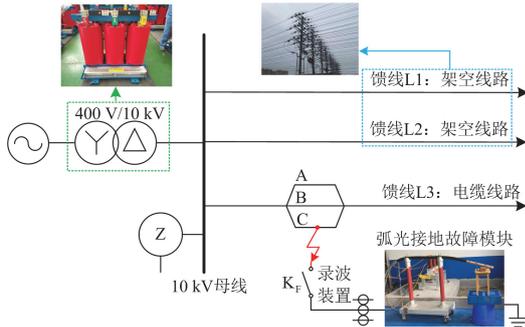


图 8 配电网真型实验室现场接线图

Fig. 8 Wiring diagram of distribution network field experiment

受现场实验成本限制, 无法对所有接地介质类型进行弧光接地故障实验。同时弧光接地故障接地介质类型主要是树枝、土壤和混凝土路面。因此本文选取树枝作为圆柱体电极介质、土壤和混凝土路面作为无穷远地面电极介质, 在馈线 L3 上的 C 相进行弧光接地故障实验, 获得 AGF 电流  $i_f$  波形。

在 AGF 仿真实验中, 设置时间常数  $\tau$  为  $3 \times 10^{-6}$  s, 图 7 中 AGF 模型的电弧相关参数如表 2 所示。

表 2 电弧相关参数

Table 2 Arc-related parameters

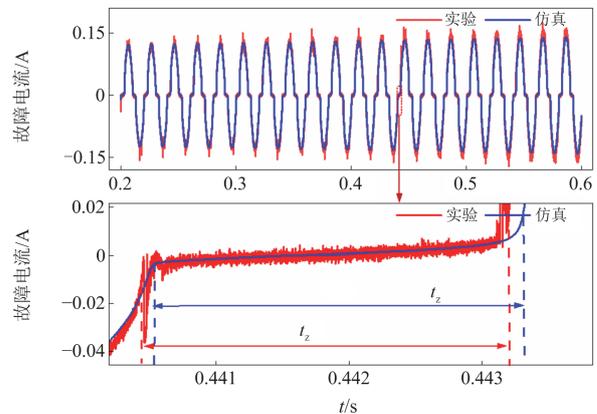
参数	值	参数	值
$U_0/\text{kV}$	10.5	$k$	$10^5$
$G_{\min}/(\text{S/m})$	$10^{-6}$	$I_0/\text{A}$	75
$\sigma_0/(\text{S/m})$	$1.5 \times 10^5$	$T_0/\text{K}$	298.5
$\sigma$	$5.68 \times 10^{-8}$	$T_w/\text{ms}$	80
$r_{\text{arc\_ini}}/\text{mm}$	0.1	$\varepsilon$	0.5
			0.2 (白桦)
$L_{\text{arc\_ini}}/\text{mm}$	40 (红土、OPC 混凝土)	$V_c/(\text{m/s})$	0 (红土、OPC 混凝土)

树木采用常见白桦树, 土壤采用湖南地区普遍分布的红土, 混凝土为 OPC 混凝土。树枝电阻占整棵树木电阻的 90% 以上, 因此为方便进行实验, 选取半径为 0.025 m、长度为 0.5 m 的新鲜白桦树枝作为圆柱体电极介质。为控制并测得无穷远地面介质的相关材料参数, 选用  $H = 0.5$  m、 $r_1 = 0.5$  m 的土壤、混凝土试块作为无穷远地面电极介质。设置白桦、红土和 OPC 混凝土电极相关参数, 如表 3 所示。将白桦、红土、OPC 混凝土接地介质下的 AGF 电流实验波形与仿真波形进行对比, 如图 9 所示。

表 3 白桦、红土、OPC 混凝土相关参数

Table 3 Parameters of birch, red soil and OPC concrete

参数	白桦	红土	OPC 混凝土
$r_1/\text{m}$	0.025	0.5	0.5
$H/\text{m}$	0.5	0.5	0.5
$\rho_0/(\Omega \cdot \text{m})$	185.8	94.39	149.7
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	763.7	1902	2382
$C_p/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	2440	1414	1002
$E_{\text{bk}}/(\text{V}/\text{m})$	$5 \times 10^5$	$6.7 \times 10^4$	$5.2 \times 10^5$
$k_m$	0.9	0.83	0.92
$A$	7000	9000	7000



(a) 白桦接地介质电极

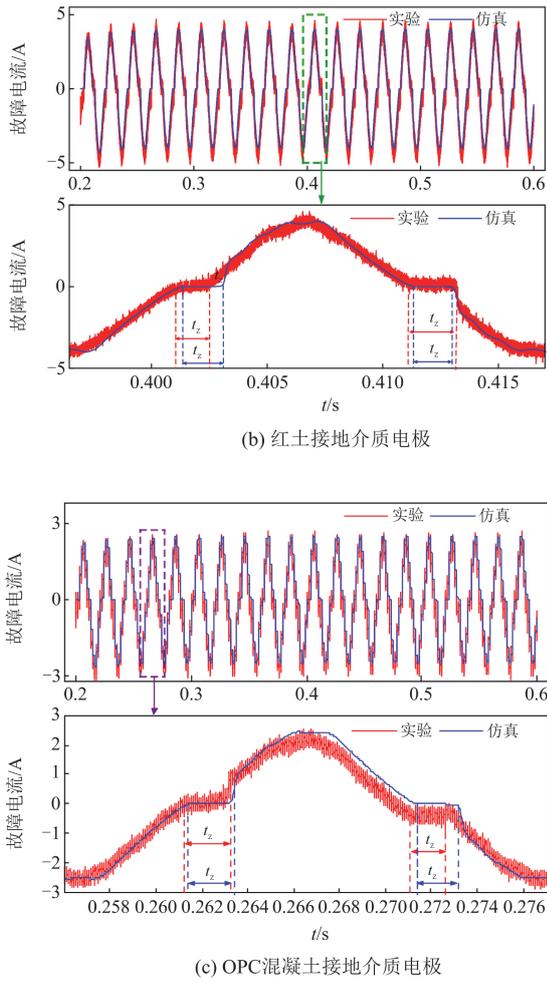


图9 现场实验与模型的电流波形对比

Fig. 9 Comparison of current waveforms between field experiments and models

如图9所示,在AGF电流进入或离开零休时间段时,电弧等离子体仍维持较高温度,且电弧与接地介质间存在电压差,使得输入功率 $p_{in\_arc}$ 与耗散功率 $p_{loss}$ 形成动态能量“博弈”,导致AGF电流在零休状态边界处易发生突变或阶跃,该现象与文献[29]中故障电流形态一致。

以AGF电流幅值 $I_{f\_max}$ 、零休时间 $t_z$ 作为特征参数判别依据,结果见表4。

表4 特征参数判别

Table 4 Characteristic parameter identification

接地介质	$t_z/ms$		$I_{f\_max}/A$	
	仿真	实验	仿真	实验
白桦	2.82~3.14	2.47~3.06	0.12~0.16	0.11~0.14
红土	1.43~1.72	1.24~1.67	3.75~3.97	3.73~4.86
OPC 混凝土	1.56~1.77	1.65~1.84	2.27~2.48	2.54~3.03

如图9(b)、图9(c)所示,与圆柱体接地介质(如白桦树枝)相比,以红土、OPC混凝土为代表的无穷远地面电极作为接地介质时, $i_f$ 幅值显著增大,使得电弧有较大的输入功率 $p_{in\_arc}$ ,电弧电流更易脱离零休“博弈”状态,即零休时间 $t_z$ 较短。

利用波形相关系数量化AGF电流仿真波形与实验波形的相似性。然而单一电压周期(20 ms)波形相关系数无法充分反映两波形在整个故障时段的动态变化<sup>[11]</sup>,因此本文采用涵盖整个故障时段的全周期相关系数 $R$ ,从而更准确地量化仿真与实验波形的整体相似性。

同时,为增加相似性评估的鲁棒性,减少噪声和相位偏移的影响,本文利用Hilbert变换获取仿真波形 $I_{f\_sim}$ 和实验波形 $I_{f\_exp}$ 的正交分量 $\hat{I}_{f\_sim}$ 、 $\hat{I}_{f\_exp}$ ,进而得到瞬时包络 $E_{sim}(t)$ 、 $E_{exp}(t)$ ,表达式分别如式(21)、式(22)所示。

$$E_{sim}(t) = \sqrt{I_{f\_sim}^2(t) + \hat{I}_{f\_sim}^2(t)} \quad (21)$$

$$E_{exp}(t) = \sqrt{I_{f\_exp}^2(t) + \hat{I}_{f\_exp}^2(t)} \quad (22)$$

因此使用瞬时包络信号计算采样点数为 $N$ 的两波形全周期相关系数,表达式如式(23)所示。

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N [E_{sim}(n) - \bar{E}_{sim}] \cdot [E_{exp}(n) - \bar{E}_{exp}]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [E_{sim}(n) - \bar{E}_{sim}]^2 \cdot \sum_{n=1}^N [E_{exp}(n) - \bar{E}_{exp}]^2}} \quad (23)$$

式中: $\bar{E}_{sim}$ 、 $\bar{E}_{exp}$ 分别为瞬时包络 $E_{sim}(n)$ 、 $E_{exp}(n)$ 的均值。经计算得到白桦、红土、硅酸盐混凝土的电流波形同实验波形间的全周期相关系数分别为0.9173、0.8734和0.9064。因此,本文所提模型能较为准确地描述白桦、红土、OPC混凝土等接地介质下的弧光接地故障,与实际故障工况相符。

#### 4 混合串联消弧措施分析

混合串联消弧(arc suppression device, ASD)措施下的中性点非有效接地10 kV配电网模拟简图如图10所示,相关参数如表5所示。其中,ASD装置由无源ASD和有源ASD组成。无源ASD由Z型接地变压器(T1)、隔离变压器(T2)和多端联动控制器构成。Z型接地变T1用于产生中性点,连接方式为Zny11。而隔离变T2用于向中性点注入电压。两个变压器的二次侧通过多端联动控制器( $S_{an}$ 、 $S_{bn}$ 、 $S_{cn}$ 、 $S_{ap}$ 、 $S_{bp}$ 、 $S_{cp}$ )连接,以选择向中性点注入电压的合适系统线电压。有源ASD由电压源和单相电压源逆变器组成,并通过LC滤波器连接到隔离变压器(T3),实现无源ASD与有源ASD串联。

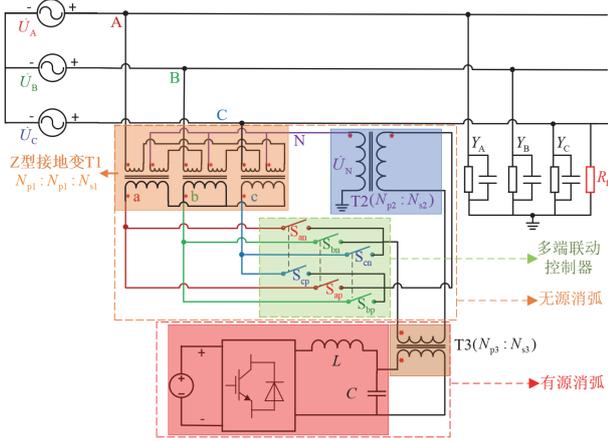


图 10 基于混合串联消弧措施的配电网

Fig. 10 Distribution network with the hybrid series ASD

表 5 10 kV 模拟配电网相关参数

Table 5 Parameters of the 10 kV simulated distribution network

参数	值	参数	值
Z 型接地变 T1 匝数比 ( $N_{p1}:N_{s1}$ )	10:10:0.4	T1 容量/kVA	500
隔离变 T2 匝数比 ( $N_{p2}:N_{s2}$ )	10:0.4	T2 容量/kVA	500
隔离变 T3 匝数比 ( $N_{p3}:N_{s3}$ )	8:0.1	T3 容量/kVA	500
T1 漏抗 $Z_{lk-T1}/\mu\text{H}$	18.39	对地电阻 $R_X/\text{k}\Omega$	10
T2 漏抗 $Z_{lk-T2}/\mu\text{H}$	0.405	对地电容 $C_X/\mu\text{F}$	8.36
T3 漏抗 $Z_{lk-T3}/\mu\text{H}$	0.814	频率 $\omega/\text{Hz}$	50

其中, 线电压  $\dot{U}_Q$  与正序相电压(如  $\dot{U}_{ca}$  和  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_{ab}$  和  $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_{bc}$  和  $\dot{U}_C$ )完全相反。各组的幅度关系取决于接地变 T1 匝数比  $N_{T1} = N_{p1} : N_{s1}$ ,  $N_{p1}$ 、 $N_{s1}$  分别为接地变 T1 高压侧与低压侧的匝数。因此  $\dot{U}_Q$  的表达式如式(24)所示。

$$\dot{U}_Q = \begin{cases} \dot{U}_{ca} = \frac{-N_{s1}}{\sqrt{3}N_{p1}}\dot{U}_A (\text{A相故障, } S_{an}, S_{cp} \text{ 闭合}) \\ \dot{U}_{ab} = \frac{-N_{s1}}{\sqrt{3}N_{p1}}\dot{U}_B (\text{B相故障, } S_{bn}, S_{ap} \text{ 闭合}) \\ \dot{U}_{bc} = \frac{-N_{s1}}{\sqrt{3}N_{p1}}\dot{U}_C (\text{C相故障, } S_{cn}, S_{bp} \text{ 闭合}) \end{cases} \quad (24)$$

在理想变压器下, 中性点电压  $\dot{U}_N$  的关系式为

$$\dot{U}_N = N_{T2}\dot{U}_Q = -N_{T2}N_{T1}^{-1}\dot{U}_X (X = A, B, C) \quad (25)$$

式中:  $N_{T2}$  为变压器 T2 的匝数比,  $N_{T2} = N_{p2} : N_{s2}$ 。

若想实现消弧, 则必须有  $\dot{U}_N = -\dot{U}_X$ , 因此需要  $N_{T2}$  等于  $N_{T1}$ , 即  $N_{p2} : N_{s2} = N_{s1} : \sqrt{3}N_{p1}$ 。然而, 无源消弧 ASD 无法补偿多端联动控制器在运行过

程中因变压器漏抗而产生的相移。同时, AGF 普遍为高阻接地故障, 因此需采用电压消弧措施实现可靠消弧<sup>[18]</sup>。针对这一问题, 采用串联有源电压消弧设计方案。因此, 考虑相位误差影响时, 需进一步考虑接地变 T1 的漏抗。将图 10 的配电网拓扑变换到隔离器 T2 高压侧, 如图 11 所示。

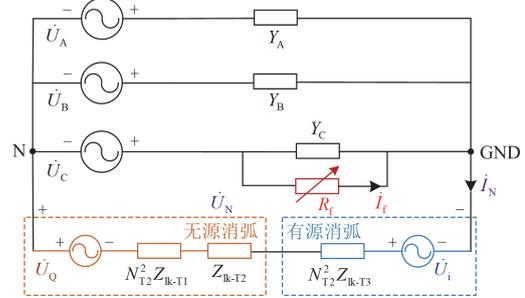


图 11 含混合串联 ASD 的等效配电网

Fig. 11 Equivalent distribution network with hybrid series ASD

假设 C 相发生 AGF, 混合串联 ASD 配电网零序电路如图 12 所示。图 12(a)为仅采用无源 ASD 配电网, 图 12(b)为采用混合串联 ASD 配电网。  $G_\Sigma$  为配电网阻抗, 如式(26)所示,  $Y_X$  为对地导纳。

$$G_\Sigma = (Y_A + Y_B + Y_C)^{-1} \quad (26)$$

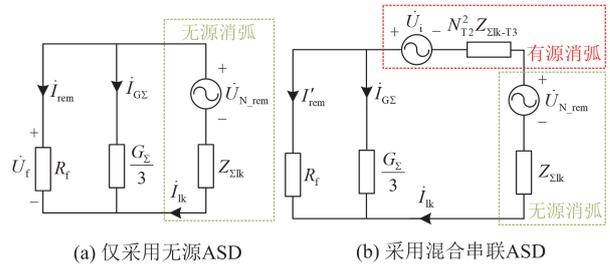


图 12 配电网 AGF 下的零序电路

Fig. 12 Zero-sequence circuit of distribution network under AGF

仅采用无源 ASD 措施下, 需考虑变压器漏抗的影响, 其中  $Z_{\Sigma lk} = N_{T2}^2 Z_{lk-T1} + 3Z_{lk-T2}$ 。图 11 中无源 ASD 投入后, 若故障电流  $I_f$  为 0(即故障电压  $\dot{U}_f$  为 0), 可成功消除 AGF。根据基尔霍夫电压定律, 中性点电压  $\dot{U}_N$  的表达式如式(27)所示。

$$\dot{U}_N = -\dot{U}_C(1 + 3Z_{\Sigma lk}G_\Sigma^{-1}) \quad (27)$$

如图 12(a)所示, 由于漏抗的存在, 使得在高阻接地情况下故障中仍有由变压器中漏抗  $Z_{\Sigma lk}$  引发的中性点电压  $\dot{U}_N$  相位差所带来的残余电压  $\dot{U}_{N,rem}$ ,  $\dot{U}_{N,rem} = -3Z_{\Sigma lk}G_\Sigma^{-1}\dot{U}_C$ 。这使得中性点电压难以达到期望值, 可能存在微弱弧光。利用基尔霍夫电压定律得到精确的剩余电流  $i_{rem}$ , 如式(28)所示。

$$\dot{I}'_{\text{rem}} = \frac{-3Z_{\Sigma\text{lk}}\dot{U}_C}{R_f G_{\Sigma} + Z_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \quad (28)$$

因此, 在弧光高阻接地故障的条件下, 只采用无源 ASD 措施, 仅将故障电流限制为接近零, 存在剩余电流  $\dot{I}'_{\text{rem}}$ 。要实现有效消弧(即  $\dot{U}_N = -\dot{U}_C$ ), 还需要进一步消除  $3Z_{\Sigma\text{lk}}G_{\Sigma}^{-1}\dot{U}_C$ , 将  $\dot{U}_f$  抑制在电弧灭弧电压(400 V)以下, 实现可靠消除 AHGF 故障<sup>[15,20]</sup>。

图 12(b)中, 针对高阻弧光接地故障的特性, 采用有源 ASD 与无源 ASD 串联结合的方法, 两者相互配合, 简称为混合串联 ASD。由于采用串联结合的方式, 有源 ASD 未投入时, 线路需为导通状态, 且需对有源 ASD 中电力电子设备进行电气隔离保护, 则有源 ASD 连接隔离变压器 T3。因此在有源 ASD 投入后, 变压器 T3 将引发漏抗  $Z_{\text{lk-T3}}$ 。

在接入有源 ASD 后, 变压器漏抗则变为  $Z'_{\Sigma\text{lk}} = Z_{\Sigma\text{lk}} + N_{T2}^2 Z_{\text{lk-T3}}$ , 剩余电流  $\dot{I}'_{\text{rem}}$  如式(29)所示。

$$\dot{I}'_{\text{rem}} = \frac{(\dot{U}_i + \dot{U}_{N_{\text{rem}}})G_{\Sigma}}{R_f G_{\Sigma} + Z'_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \quad (29)$$

式中:  $\dot{U}_i$  为有源 ASD 输入电压。根据基尔霍夫电流定律可得, 在混合串联消弧措施下, 流经配电网阻抗的电流  $\dot{I}_{G\Sigma}$  和流经漏抗的电流  $\dot{I}_{\text{lk}}$  的表达式分别如式(30)、式(31)所示。

$$\dot{I}_{G\Sigma} = \frac{3(\dot{U}_i + \dot{U}_{N_{\text{rem}}})R_f}{R_f G_{\Sigma} + Z'_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \quad (30)$$

$$\dot{I}_{\text{lk}} = -(\dot{I}_{\text{rem}} + \dot{I}_{G\Sigma}) = -\frac{(\dot{U}_i + \dot{U}_{N_{\text{rem}}}) \cdot (G_{\Sigma} + 3R_f)}{R_f G_{\Sigma} + Z'_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \quad (31)$$

显然, 如果控制输入电压  $\dot{U}_i = -\dot{U}_{N_{\text{rem}}}$ , 则故障相电压和剩余电流将被抑制为零, 从而可以完全消除故障电弧。根据戴维宁-诺顿定理可知, 有源 ASD 等效阻抗为  $Z_i = Z'_{\Sigma\text{lk}} + (G_{\Sigma}/3)//R_f$ 。由于有源 ASD 与无源 ASD 串联, 两者在混合消弧措施下的等效阻抗相等。因此, 有源 ASD 和无源 ASD 的有功功率  $P_{\text{active}}$ 、 $P_{\text{passive}}$  的表达式分别如式(32)、式(33)所示。

$$P_{\text{active}} = \text{Re} \left( \dot{U}_i^2 \frac{3R_f + G_{\Sigma}}{R_f G_{\Sigma} + Z'_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \right) \quad (32)$$

$$P_{\text{passive}} = \text{Re} \left( \dot{U}_N^2 \frac{3R_f + G_{\Sigma}}{R_f G_{\Sigma} + Z'_{\Sigma\text{lk}}(3R_f + G_{\Sigma})} \right) \quad (33)$$

故而, 若在完全消弧的情况下, 结合式(27)、式(32)、式(33), 有源 ASD 的有功功率占混合串联消弧总有功功率的比例  $\eta$  表达式如式(34)所示。

$$\eta = \frac{P_{\text{active}}}{P_{\text{active}} + P_{\text{passive}}} = \text{Re} \left( \frac{\dot{U}_i^2}{\dot{U}_i^2 + \dot{U}_N^2} \right) \quad (34)$$

因此在完全消弧情况下, 有源 ASD 的有功功率占比仅为 5.36%, 小于混合并联电流消弧措施<sup>[24]</sup>下的 12.4%, 进一步减少功耗。图 13 为本文所提混合串联消弧中有源电压 ASD 的控制框图。其中:  $\dot{U}_{Ns}$  为 ASD 装置输出电压, 采用电流内环 + 电压 PR 外环的控制系统结构;  $i_c$ 、 $i_{\text{eq}}$  分别为电容电流反馈、等效源电流反馈;  $G_i$ 、 $G_u$  分别为电流 PI 内环传递函数、电压 PR 外环传递函数<sup>[30]</sup>;  $H_{ic}$ 、 $H_u$  分别为电容电流反馈系数、有源 ASD 输出电压前馈系数<sup>[22]</sup>;  $\dot{U}_0$  为逆变器输出电压;  $\dot{U}_N^*$  为电压消弧指令值(故障相电压的反向电压)。L 和 C 分别为逆变器的滤波电感和滤波电容。从表 5 中可知, 隔离变 T2、T3 的漏抗明显远小于接地变的漏抗, 因此在简化的配电网中, 忽略 T2、T3 的漏抗。

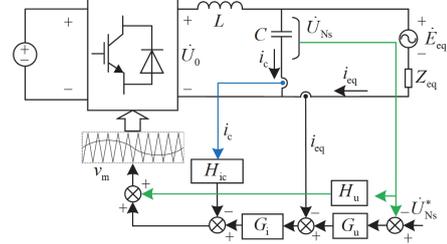


图 13 有源电压 ASD 控制框图

Fig. 13 Control block diagram of active voltage ASD

将配电网视为串联的电压源  $\dot{E}_0$  和零序阻抗  $Z_0$ 。将配电网模型转换为隔离变压器 T3 高压侧, 变压器 T3 的匝比为  $N_{T3}$ 。由于本文采用混合串联消弧措施,  $\dot{E}_0$  和  $Z_0$  同漏抗  $Z_{\text{lk-T0}}$  和线电压  $\dot{U}_Q$  串联, 可得配电网等效电压源  $\dot{E}_{\text{eq}} = (\dot{E}_0 + \dot{U}_Q)/N_{T3}$ 、等效阻抗  $Z_{\text{eq}} = (Z_0 + Z_{\text{lk-T1}})/N_{T3}^2$ 。

## 5 混合串联消弧对 AGF 消弧效果验证

为了验证所提混合串联 ASD 对接地介质为白桦、红土、OPC 混凝土路面的 AGF 的消弧效果, 在 MATLAB/Simulink 中对配电网和图 10 所示的混合串联 ASD 进行建模仿真, 配电网参数如表 5 所示。仿真中, 0.2 s 在配电网 A 相发生弧光接地故障。为了更好地比较无源 ASD 和混合串联 ASD 的消弧效果, 在 0.6 s 时闭合多端联动控制器( $S_{\text{an}}$  和  $S_{\text{cp}}$ ), 仅无源 ASD 投入; 而有源 ASD 在 0.9 s 投入(即混合串联 ASD 完全投入)。利用中性点电压  $\dot{U}_N$ 、故障相电压  $\dot{U}_A$  和故障电流  $\dot{I}_f$  的波形描述混合串联消弧装置的消弧效果, 如图 14—图 16 所示。仿真数据如表 6 所示,  $I_f$  和  $I_{f\text{-pre}}$  分别为混合串联电压消弧后、

前的故障电流幅值。

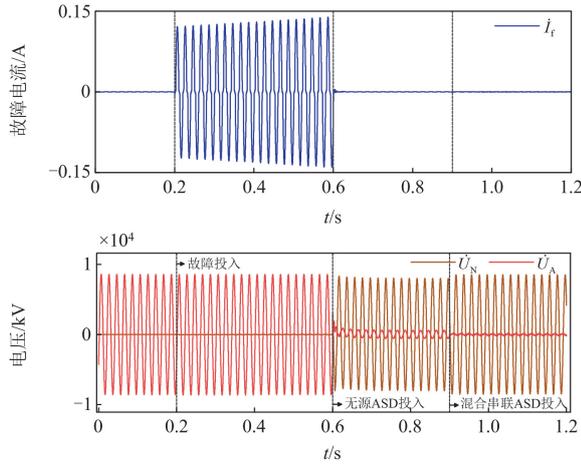


图 14 A 相弧光高阻接地故障(白桦)  
Fig. 14 AHGF fault at phase A (birch)

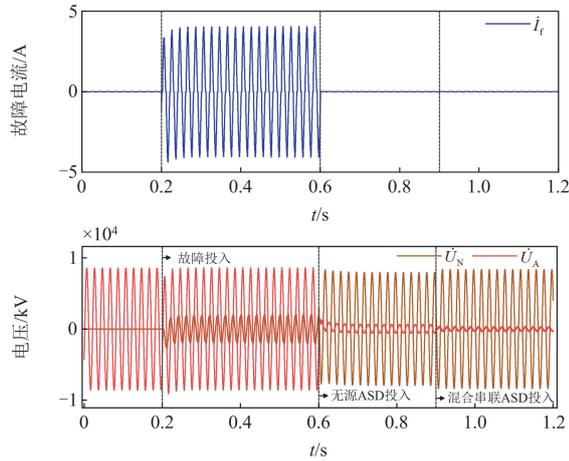


图 15 A 相弧光高阻接地故障(红土)  
Fig. 15 AHGF fault at phase A (red soil)

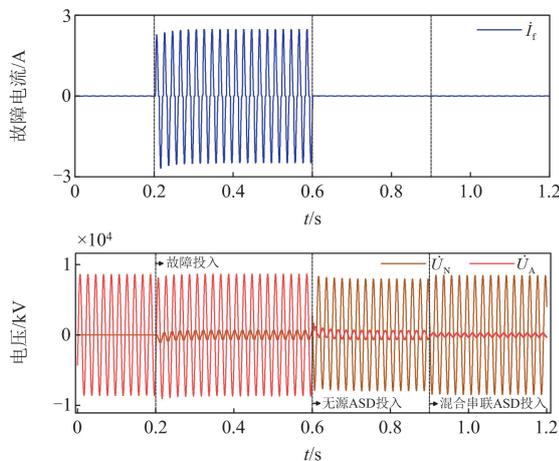


图 16 A 相弧光高阻接地故障(OPC 混凝土)  
Fig. 16 AHGF fault at phase A (OPC concrete)

表 6 混合串联 ASD 消弧效果

Table 6 Arc suppression effect of hybrid series ASD

接地 介质	故障发生		仅无源 ASD		混合串联 ASD		$\eta_{ASD}/\%$
	$U_{p-pre}/V$	$I_{F-pre}/A$	$U_p/V$	$I_F/A$	$U_p/V$	$I_F/A$	
白桦	8500	0.145	585.6	$4 \times 10^{-4}$	192.1	$2 \times 10^{-4}$	97.7
红土	8500	3.943	623.8	$5 \times 10^{-4}$	218.2	$4 \times 10^{-4}$	97.4
OPC 混凝 土	8500	2.486	644.2	$5 \times 10^{-4}$	222.4	$3 \times 10^{-4}$	97.3

当接地介质为白桦、红土、OPC 混凝土 AHGF 发生时，由于高阻接地特性，故障线路阻抗远小于弧光接地故障电阻，故障点距离对消弧效果的影响可以忽略<sup>[22]</sup>，即可认为  $\dot{U}_f$  与  $\dot{U}_A$  相当。定义消弧率  $\eta_{ASD}$  用于评估该混合串联电压消弧性能，表达式为

$$\eta_{ASD} = 1 - U_p / U_{p-pre} \quad (35)$$

式中： $U_{p-pre}$  和  $U_p$  分别为混合串联电压消弧前、后的故障相电压幅值。

仅当无源 ASD 投入时， $I_f$  被抑制至近零状态， $U_p$  均降至 644.2 V 以下，如图 14—图 16 所示。但受变压器漏抗影响， $U_p$  仍高于灭弧阈值 400 V<sup>[15,20]</sup>，使得电弧微弱存在。引入有源 ASD 串联补偿后，通过中性点相位误差校正， $U_p$  被进一步抑制至灭弧电压以下，实现有效且可靠消弧。

仿真结果表明：针对白桦、红土及 OPC 混凝土等典型接地介质引发的 AHGF，所提混合串联消弧拓扑可在降低有源 ASD 有功占比条件下实现 97% 以上的消弧率。

## 6 结论

本文针对现有弧光接地故障模型忽略传热效应导致电弧动态特性失真，以及传统消弧方法高阻工况适应性不足的问题，提出了一种计及传热效应的弧光接地故障模型与混合消弧策略，结论如下。

1) 针对传统模型未考虑介质动态击穿与电弧传热交互作用的问题，提出接地介质-电弧传热耦合建模方法。通过区分圆柱体接地与无穷远地面电极两类工况，建立计及介质击穿、电阻率温变特性的动态接地电阻模型；结合变尺寸 Mayr-Cassie 组合电弧模型，动态表征电弧几何形变与传热效应，同步解析接地介质状态演变与电弧非线性零休特性，提升高阻故障动态过程的模拟精度。

2) 针对传统消弧装置中性点电压偏移与非完全灭弧问题，设计无源消弧与有源电压消弧串联的混合拓扑。利用有源消弧实现中性点相位补偿，在

降低有源消弧有功损耗占比的同时, 可对触白桦、红土及 OPC 混凝土击穿引发的 AHGF 实现可靠消弧。

通过 MATLAB/Simulink 仿真与 10 kV 真型实验验证, 本文所提故障模型可准确有效表征故障特性, 混合消弧策略在高阻工况下展现出可靠消弧效果。为配电网弧光接地故障防护提供了新的故障理论支撑与消弧技术路径。

## 参考文献

- [1] ZHAO Qi, ZHANG Lu, NAN Dongliang et al. Reliability assessment method for power grid security and stability control devices based on weibull fault rate fitting[J]. IEEE Access, 2023, 11: 86351-86361.
- [2] 王鹤, 韦搏, 李石强, 等. 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 61-72.  
WANG He, WEI Bo, LI Shiqiang, et al. Fault diagnosis of a DC distribution network based on Bayesian network information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 61-72.
- [3] 闫明, 郭文豪, 胡永乐, 等. 基于 5G 的配电网智能故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 15-20.  
YAN Ming, GUO Wenhao, HU Yongle, et al. Intelligent fault diagnosis method of distribution network based on 5G[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 15-20.
- [4] 卓越, 曾祥君, 彭红海, 等. 配电网接地故障相主动降压消弧成套装置及其现场试验[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 48-58.  
ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, PENG Honghai, et al. Arc suppression device with active reduction of grounding fault phase voltage and field test for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 48-58.
- [5] 陈朝阳, 朱辉, 何轶聪, 等. 多馈线电缆线路弧光过电压传递特性与抑制措施[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 323-333.  
CHEN Chaoyang, ZHU Hui, HE Yicong, et al. Arc over-voltage transmission characteristics and suppression measures of multi-feeder cable[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 323-333.
- [6] 尹一卓, 王军, 宁鑫, 等. 植被含水率对导线触树单相接地故障特性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 119-127.  
YIN Yizhuo, WANG Jun, NING Xin, et al. Effect analysis of vegetation moisture content on a tree-contact single-phase-to-ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 119-127.
- [7] 欧阳帆, 余笑龙, 徐彪, 等. 基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 10-19.  
OUYANG Fan, SHE Xiaolong, XU Biao, et al. A method for dividing the forest fire risk levels caused by a ground fault risk levels on distribution lines based on multiple index comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 10-19.
- [8] 张帆, 薛永端, 徐丙垠. 基于熄弧后主谐振频率的系统电容电流测量方法误差分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2): 164-172.  
ZHANG Fan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Error analysis of system capacitance current measuring method based on main resonant frequency after arc extinction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 164-172.
- [9] 李冠华, 李雁, 刘志宇, 等. 66 kV 消弧线圈接地系统单相接地电弧燃弧特性试验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 225-233.  
LI Guanhua, LI Yan, LIU Zhiyu, et al. Study on arcing characteristics test of single-phase grounding arc in 66 kV Petersen-coil grounding system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 225-233.
- [10] 李辉, 李航, 陈尚, 等. 配电网单相接地故障电弧特性分析及真型试验技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(4): 45-52.  
LI Hui, LI Hang, CHEN Shang, et al. Study on arc characteristics of single-phase grounding fault and true type test technology in distribution network[J]. Distribution and Utilization, 2024, 41(4): 45-52.
- [11] 钟逸涵, 邓丰, 史鸿飞, 等. 基于动态电阻串联的高阻接地故障精确建模[J]. 电工技术学报, 2024, 39(07): 2046-2059.  
ZHONG Yihan, DENG Feng, SHI Hongfei, et al. Accurate modeling of high impedance fault based on dynamic impedance series connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2046-2059.
- [12] 梁栋, 徐丙垠, 唐毅, 等. 10 kV 架空导线单相触树接地故障模型及其检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5221-5232.  
LIANG Dong, XU Bingyin, TANG Yi, et al. Model and detection method for tree-contact single-phase-to-ground faults on 10 kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [13] 张延辉, 童雪芳, 谭波, 等. 基于土壤电阻率温度特性的接地极电热全耦合分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(11): 1006-1013.  
ZHANG Yanhui, TONG Xuefang, TAN Bo, et al. Fully coupled analysis of current and temperature fields of grounding poles based on soil resistivity and temperature characteristics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11): 1006-1013.
- [14] 刘琨, 崔鑫, 王宾, 等. 配电网线路生物体高阻接地故障特性对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22):

- 67-74.  
LIU Kun, CUI Xin, WANG Bing, et al. Comparative analysis of high impedance grounding fault characteristics via an organism in distribution lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 67-74.
- [15] GAO Wei, HE Wenxiu, WAI Rongjiong, et al. High-impedance arc fault modeling for distribution networks based on dynamic geometry dimension[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 229.
- [16] RAN Jiaquan, YANG Qing, HE Lewei, et al. Improved mathematical model for single-ground arcing fault in medium voltage distribution networks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022: 1-10.
- [17] 张彪, 周申培, 吴细秀, 等. 配电网间歇性重燃电弧模型的建立与断续弧光接地故障特征分析研究[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2207-2217.  
ZHANG Biao, ZHOU Shenpei, WU Xixiu, et al. Establishment of intermittent reignition arc model and analysis of intermittent arcing ground faults in distribution network[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2207-2217.
- [18] 刘科研, 盛万兴, 董伟杰. 配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 12-22.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, DONG Weijie. Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 12-22.
- [19] ZHOU Tong, TAO Yuan, WEI Siyu, et al. Temperature and composition of AC arc plasma of medium voltage distribution networks in the air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(22).
- [20] ZHOU Tong, YANG Qing, YUAN Tao, et al. A novel mathematical-physical arc model and its application to the simulation of high-impedance arc faults in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(03): 1794-1806.
- [21] WEI Mingjie, LIU Weisheng, SHI Fang, et al. Distortion-controllable arc modeling for high impedance arc fault in the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 52-63.
- [22] 刘琼, 王文, 范必双, 等. 计及线路阻抗与负荷影响的不平衡配电网电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 24-31.  
LIU Qiong, WANG Wen, FAN Bishuang, et al. Voltage-type arc suppression method for an unbalanced distribution network considering the influence of line impedance and load[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 24-31.
- [23] FAN Bishuang, YAO Ganzhou, WANG Wen, et al. Principle and control design of a novel hybrid arc suppression device in distribution networks[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2022, 69(1): 41-51.
- [24] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [25] CONG Zihan, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Study on the mechanism and electrical characterization of the tree-contact incipient fault in the non-effectively grounded system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1709-1819.
- [26] GLASS S V, ZELINKA S L. Wood handbook—wood as an engineering material[M]. WI, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021.
- [27] SAWICKI A. Improvements of hybrid models of the electric arc of variable geometrical parameters[C] // 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), November 12-14, 2018, Kielce, Poland: 1-6.
- [28] 王伟宗, 吴翊, 荣命哲, 等. 局域热力学平衡态空气电弧等离子体输运参数计算研究[J]. 物理学报, 2012, 61(10): 272-281.  
WANG Weizong, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. Theoretical computation studies for transport properties of air plasmas[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(10): 272-281.
- [29] JIANG Chenshihao, BI Maoqiang, ZHANG Shiyu, et al. Study on arc characteristics and combustion feature of tree-wire discharge fault in distribution line[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 230.
- [30] 丁敬明, 邹贵彬, 周成瀚, 等. 考虑参数不对称的配电网单相接地故障柔性消弧方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 58-67.  
DING Jingming, ZOU Guibin, ZHOU Chenghan, et al. A flexible arc suppression method for a single-phase grounding fault in a distribution network considering parameter asymmetry[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 58-67.

收稿日期: 2024-10-21; 修回日期: 2025-02-21

作者简介:

蒋冲(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网接地故障模拟及分析; E-mail: 1368362151@qq.com

范必双(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子系统控制及电机驱动、电能质量及配电网有源消弧、风力发电变桨控制及风机叶片抗冰技术、电力机器人。E-mail: fanbishuang@qq.com

(编辑 许威)